第 37 卷第 5 期 生 态 学 报 Vol.37,No.5
2017 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201509241961

张晓艳, 褚建民, 孟平, 姚增旺, 王鹤松, 李得禄,姜生秀.民勤绿洲荒漠过渡带梭梭(*Haloxylon ammodendron*(C.A.Mey)Bunge)树干液流特征及其对环境因子的响应.生态学报,2017,37(5):1525-1536.

Zhang X Y,Chu J M,Meng P, Yao Z W,Wang H S,Li D L, Jiang S X.The effect of environmental factors on stem sap flow characteristics of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Minqin oasis-desert.Acta Ecologica Sinica,2017,37(5):1525-1536.

民勤绿洲荒漠过渡带梭梭(*Haloxylon ammodendron*(C. A.Mey)Bunge)树干液流特征及其对环境因子的响应

张晓艳[1], 褚建民[1,*], 孟 平[1], 姚增旺[1], 王鹤松[2], 李得禄[3],姜生秀[3]

1 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室,北京 100091

2 北京林业大学林学院,北京 100083

3 甘肃省治沙研究所民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,武威 733000

摘要:利用 Grainer 热扩散式探针法(TDP)连续测定民勤绿洲荒漠过渡带生长季梭梭树干液流,并同步测定外界环境因子。研究了 6—11 月份不同直径梭梭树干液流日、季变化及其与外界环境因子的相关性。结果显示:(1)随月份的递增,不同直径梭梭树干液流通量(*SV*)晴天日变化波峰区逐渐缩减。并且在 6—8 月份, 不同直径 *SV* 均表现出明显的"宽峰型"现象,且晴天 *SV* 明显高于阴、雨天;(2)随季节变化,不同直径梭梭 *SV* 波动性较大,直径越大其波动性越高;而梭梭 *SV* 未表现出随直径增大液流通量越大的现象;(3)6—11 月梭梭树干耗水量先增后降,7 月达最高峰,且直径越大,梭梭总耗水量越大;(4)梭梭树干液流与环境因子相关程度受不同天气、时间尺度的影响较大,晴天相关性略高于阴、雨天。空气温度、净辐射、饱和水汽压差是影响梭梭树干液流的主要气象因子。0—100cm 土层以上 0—250cm 根幅区土壤水分对树干液流影响最显著。(5)同比古尔班通古特沙漠梭梭生长季(5—10 月)总耗水量 458—1044kg 以及日均耗水量 1.8—6.4kg/d,整个生长季(6—11 月)民勤绿洲荒漠过渡带梭梭的总耗水量 495—1232kg、日均耗水量为 2.0—8.3 kg/d,两者耗水量近似。利用 TDP 技术测定梭梭耗水量具有一定的可靠性。

关键词:梭梭; 气象因子; 土壤水分; 树干液流; 热扩散技术

The effect of environmental factors on stem sap flow characteristics of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge in Minqin oasis-desert

ZHANG Xiaoyan[1], CHU Jianmin[1,*], MENG Ping[1], YAO Zengwang[1], WANG Hesong[2], LI Delu[3], JIANG Shengxiu[3]

1 *Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*

2 *College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*

3 *MinQin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Gansu Desert Control Research Institute, Wuwei* 733000, *China*

Abstract: In arid and semi-arid ecosystems, water resources are the key ecological factor restricting the structure and function of the oasis-desert ecotone. The objective of the present study was to determine the effect of environmental factors on the characteristics of stem sap flow and water consumption of *Haloxylon ammodendron* in the whole growing season. Thermal dissipation sap flow velocity probes (TDPs) and an automatic weather station were used to measure sap flow velocity in trunks of different diameters, and environmental factors such as air temperature (*T*), relative humidity (RH),

基金项目:国家自然科学基金项目(31370707,31000322);国家重点基础研究发展计划(2014CB954204);中央基本科研业务费专项资金项目(200714)

收稿日期:2015-09-24; **网络出版日期**:2016-07-13

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: cjmcaf@ 163.com

solar net radiation (*Rn*), vapor pressure deficit (VPD), and precipitation (*P*), respectively, in the Minqin oasis-desert ecotone, Gansu Province, China, from June to November 2014. On clear days, the peak wave area of daily sap flow velocity (*SV*) of *H. ammodendron* trunks of different diameters gradually reduced with changing seasons, whereas the phenomenon "broad peak shape" of *SV* showed as excessive growth from June to August. The *SV* on cloudy or rainy days was lower than that on sunny days. The *SV* of different *H. ammodendron* trunk diameters often fluctuated, furthermore the larger the diameter, the higher the fluctuating during the growing season. However, there was no obvious consistency and relationship between *SV* and stem diameter. From June to November, the water consumption of *H. ammodendron* initially decreased, and the highest peak *SV* was in July. The larger the stem diameter, the water consumption was more higher. Environmental factors correlated positively with *SV* in different time scales and weather conditions. The weather condition effected the *SV* correlation of *H. ammodendron* significantly, where it was higher on sunny than on cloudy and rainy days. The correlation of *SV* with VPD was the highest with the total weather factors on sunny and rainy days, while the correlation of *SV* with Rn was the highest on cloudy days. In the study period, the correlation coefficitents between *SV* and *T* exceeded 0.842 ($P<0.01$). Rn was the second-most important influence on *SV* ($R^2=0.811$, $P<0.01$), with the third influence factor of VPD ($R^2=0.769$, $P<0.01$). The correlation of *SV* with soil moisture in the root area at 0—250 cm level points and 0—100 cm depths was the most significant. Therefore, from the results it could be deduced that *H. ammodendron* of Minqin is an efficient drought-resistant plant.

Key Words: *Haloxylon ammodendron*; meteorological factors; soil moisture; sap flow; TDP

水资源短缺是全球面临的严峻问题[1-2]。在干旱、半干旱地区,水资源短缺现象尤为突出[3-4]。受地下水位不断下降的影响,该地区大部分草本、灌木主要依赖降水维持各种生命活动。蒸散是降水从地面返回大气的主要形式,其中每年90%以上的降水以蒸散的形式散失到大气中[5]。其中,植被蒸腾是蒸散的重要组成部分之一,也是植被生态需水的主要影响因素,在维护土壤-植被-大气(SPAC)连续体水循环过程中扮演着重要的角色[6]。由于全球变暖日趋严重[7],干旱、半干旱地区水资源日益紧缺,势必干扰植被耗水,导致各生态系统结构与功能的紊乱。因此,研究干旱、半干旱地区防风、固沙、抗旱植被蒸腾耗水意义重大。

梭梭(*Haloxylon ammodendron*)是藜科(Chenopodiaceae)落叶灌木或小乔木,属于中亚荒漠生境的耐寒、抗旱、耐盐碱C_4植物[8],具有抗旱、耐瘠薄、耐盐碱、防风固沙、维护生态系统结构与功能等作用,成为甘肃民勤绿洲荒漠区的优良固沙造林树种[9]。由于人为因素(土地开垦、地下水超采等)以及自然灾害(沙尘暴、高温、干旱等)等干扰,民勤境内梭梭林正处于大面积退化,造成固定沙丘活化,流沙向绿洲迅速蔓延[10]。目前,针对干旱区抗旱植被耗水开展了大量的研究工作[11-13],然而,系统性研究民勤梭梭整个生长季单株耗水及其与外界气象因子、土壤水分的工作未见报道。迄今,研究单株植被蒸腾耗水的方法众多[14]。其中,针对叶片和枝干尺度的测定方法主要有风调室法[15]、稳态气孔计法[16]、光合作用测定法[17];单株尺度上测定方法有整树容器法[18]、盆栽称量法[19]、稳定同位素法[20]和液流测定法[21]。液流测定法具有安装简便、操作简单、测量数据可靠性高、零污染和连续观测的优点。所以,被国际植物生理、生态研究工作者广泛应用[22-23]。利用热平衡包裹式法[24-25]、热脉冲法[11-12,26-27]分析研究梭梭耗水特征的相关研究较多,而利用热扩散法测定梭梭耗水量的研究报道较少[28-29]。

为此,本文以民勤绿洲荒漠过渡带典型固沙植物梭梭为研究对象,利用 Grainer 热扩散式探针法(TDP)连续测定梭梭整个生长季的树干液流,并同步测定梭梭样地外界环境因子。探究6—11月份不同直径梭梭树干液流日、季动态变化,同时分析梭梭树干液流及其与外界环境因子的相关性,为进一步开展植被生态需水研究奠定基础,同时为梭梭林分水分合理管理提供科学依据。

1 研究区概况

本试验区位于民勤治沙综合试验站(38°36′N,102°56′E,海拔1365m),巴丹吉林沙漠东南缘的荒漠-绿洲

过渡带。该区为典型温带大陆型气候,年均温 7.76℃,最高、最低温分别为 41.00℃、-30.80℃。年均降水量 115.90mm, 其中 65%的降水多集中于 7—9 月。年潜在蒸发量 2452.70mm,干燥度约 5.30。常年盛行西北风,平均风速 2.40m/s。土壤类型为典型荒漠土,易受风沙的强烈侵蚀而形成粗结构。灌丛及草本多生长于固定、半固定沙丘,植被类型主要有梭梭、沙拐枣(*Calligonum arborescens* (Turcz))、白刺(*Nitraria tangutorum* (Bobrow))和沙米(*Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq.)。

选取荒漠绿洲区半固定沙丘梭梭人工林(38°36′38.5″N,102°56′55.5″E)为试验样地,面积 300m×300m。土壤类型为风堆积性沙土,土壤容重 1.50—1.66 g/cm^3,最大持水量 20.06%—24.41%,毛管孔隙度 30.11%—35.31%,非毛管孔隙度 2.47%—-3.60%。样地梭梭林分基本特征为:平均地径 10.92cm、平均株高 246.40cm、平均冠幅(东西) 198.20cm、(南北)192.90cm。梭梭林地内部分生长沙拐枣、白刺和沙米。

2　材料与方法

2.1　植物树干液流及耗水量

2014 年 6 月,采用热扩散式茎流仪 TDP (TDP-10,Dynamax 公司,USA)测定梭梭树干液流。梭梭样树基本特征及 TDP 探针安装高度见表 1。具体安装步骤:选取 5 株具代表性样树,编号为 1—5 号,分别在树干东、西方位安装 10mm 探针,并用专用塑料泡沫固定探针尾部,用防辐射铝铂进行包裹,探针与 CR1000 数据采集器(Campbell Scientific Inc., USA)连接,每 2min 采集 1 次数据,每 10min 输出 1 组温差平均值。选取长势相似、直径不同(50cm 处直径分别为 9.90、10.95、13.06cm)的 1、2、3 号梭梭样树分析不同直径梭梭树干液流特征。每棵样树东、西方位的液流平均值代表该样树液流值。依据 Granier 推导的液流通量密度与温差系数(K 值)相关联经验公式进行本试验树干液流通量密度(简称树干液流通量)的计算[30]。Granier 经验公式为:

$$F_d = \alpha k^{\beta} = 119.99 \times 10^{-6} \times \{(\Delta T_{max} - \Delta T)/\Delta T\}^{1.231} \quad (1)$$

式中,F_d液流通量密度(cm^3 cm^{-2} s^{-1});ΔT_{max}零通量时两探针间最大温差(℃);ΔT 具体通量时两探针间温差(℃);K 无量纲单位;α 和 β 依赖于热量系数。

依据树干液流通量密度推算单株日蒸腾量的计算公式为:

$$Q = F_d \times A_s \times T \quad (2)$$

式中,Q 为日蒸腾量,F_d为液流通量密度(cm^3 cm^{-2} s^{-1}),A_s为边材面积(m^2),T 为 86400(s)。

选取梭梭林内具有代表性梭梭,利用染色法获取梭梭边材面积与直径的相关性。得出两者之间呈现明显的指数函数关系:

$$y = 0.699e^{0.349x} \qquad (R^2 = 0.996) \quad (3)$$

式中,y 为边材面积(cm^2),x 为直径(cm)。

2.2　气象因子

采用 CR1000 数据采集器,每 10min 记录 1 次空气温湿度(T)、空气相对湿度(RH)、光合有效辐射(PAR)、净辐射(Rn)、大气压、风速(Ws)、降水量(Rain)。饱和水汽压差(VPD)和参考作物蒸散量(ET_0)计算方法见[31-32]。

2.3　土壤水分

采用 Minitrase 时域反射仪法(TDR)(SEC002-minitrase,Soilmoisture Equipment Corp,USA)同步测定距离 3 号样树 20、150、250、400cm 共 4 水平,土层 8、50、90、150cm 共 4 垂直梯度的 16 个土壤位点的土壤体积含水量(VSW),其中距样树 20、150、250cm 水平位点为根区,400cm 水平位点为非根区。每隔 30min 测定一组数据,并利用 Wintrase 软件下载数据。最后用烘干法测定的土壤水分含量对 TDR 法测定值进行验证。

2.4　数据统计分析

采用 Excel 软件处理 2014 年 6—11 月份树干液流实测值及气象因子数据。利用 SPSS 软件进行树干液流与气象因子的相关性分析以及回归方程拟合。利用 Origin 软件进行树干液流通量及耗水量的制图。

表 1 试验区梭梭样树基本参数

Table 1 Basic parameters of *Haloxylon ammodendron*

编号 Number	株高/cm Plant height	地径/cm Ground diameter	50cm 处直径/cm Diameter	冠幅/cm Canopy diameter	枝下高/cm Under branch height	TDP 安装高度/cm TDP installation height
1	291.00	10.87	9.90	183.60/198.30	61.28	40.00
2	239.50	10.90	10.95	177.10/230.90	54.30	40.00
3	331.80	15.60	13.06	320.00/360.40	80.90	40.00
4	289.30	12.99	11.40	163.40/201.60	59.40	40.00
5	264.70	14.10	13.66	212.20/230.60	62.8	40.00

3 结果与分析

3.1 气象因子动态变化

在观测期间(2014 年 6 月 18 日—11 月 30 日)各气象因子(T、RH、PAR、Rn、VPD、Ws、ET_0)日均值以及降雨量(Rain)日累积值季节变化如图 1 所示。其中,T 先升高后降低,最高温度出现在 7 月中下旬,为 30.3℃;RH 浮动范围在 18.1%—91.4%,浮动较频繁;PAR 表现出先升后降的趋势,最高值出现在 7 月中下旬,为715.5 umol $s^{-1}m^{-2}$;Rn、VPD 先增后降,最高值出现在 7 月下旬,分别为 180.9W/m^2、3.4kPa;2m 处风速日均值最高达 4.6m/s、最低值为 0.4m/s,整体波动性较高;ET_0整体表现出逐渐减小的趋势,最高值达 6.4mm/d。从 7 月 19 日至 11 月 30 日,ET_0达到 337.5mm,日均 ET_0为 2.2mm;整个观测期内,降水量共计 93.1mm。其中 7 月 21 日降水量达到最高值 16.2mm,7 月降水量高达 34.8mm,是降水最集中的月份。

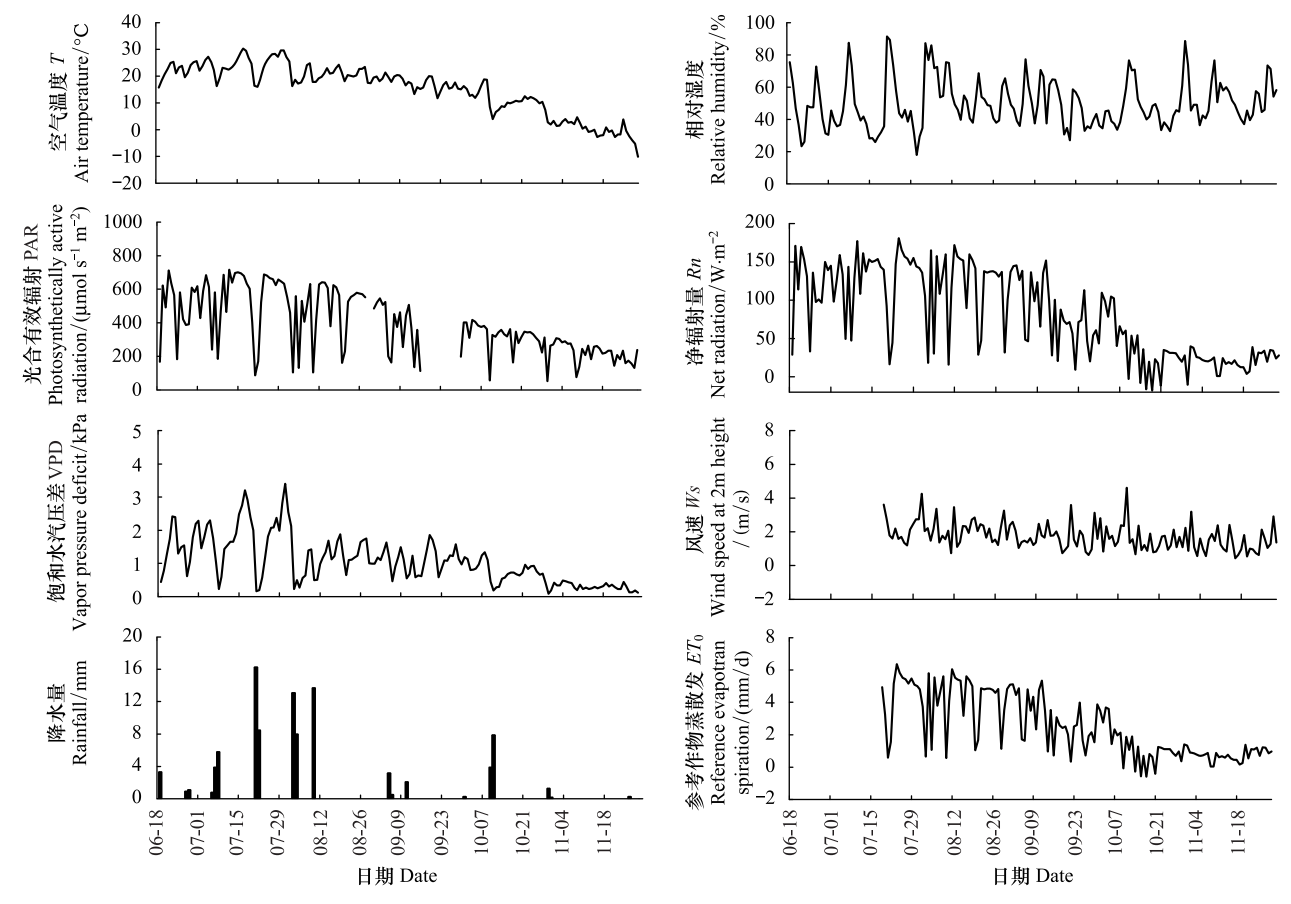


图 1 气象因子季节变化

Fig.1 Seasonal variation of meteorological parameters

3.2 树干液流通量(*SV*)日动态变化

3.2.1 典型晴天树干液流通量(*SV*)日动态变化

选取 6—11 月份典型晴天 *SV* 平均值分析各月份不同直径梭梭树干液流日变化。由图 2 可见,随月份递增,各样树 *SV* 逐渐递减。从 9 月份开始,*SV* 大幅降低。6—8 月份,1、2、3 号样树 *SV* 白天启动时间为 7:00—8:00,自 21:00 后 *SV* 均出现低谷期,树干液流最高峰呈"宽峰型",最高值分别为 21.19—24.04 $cm^3\ cm^{-2}\ h^{-1}$、19.48—22.88 $cm^3\ cm^{-2}\ h^{-1}$、13.76—19.85 $cm^3\ cm^{-2}\ h^{-1}$,出现时间在 12:00—13:50 之间。9 月份 *SV* 高峰区略有缩减,表现启动晚、低谷起点早的现象。10—11 月份,各样树 *SV* 白天启动时间在 9:00—11:00 之间。

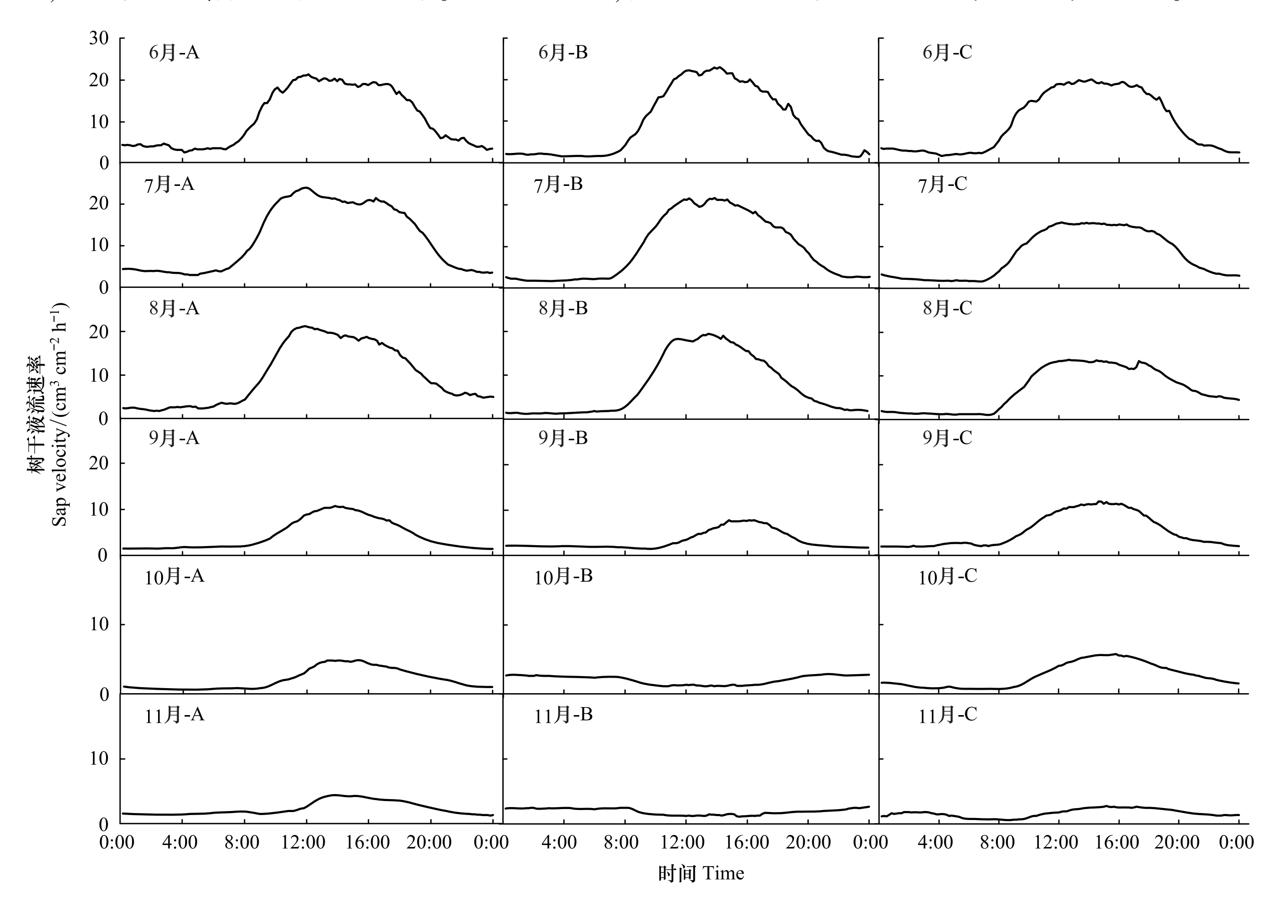


图 2 不同月份梭梭树干液流通量日变化

Fig.2 Diurnal variation of stems sap flow flux in *Haloxylon ammodendron* in different months

A,B,C 分别代表 1 号,2 号,3 号样树,其直径分别为 9.90, 10.95, 13.06cm

3.2.2 典型雨天树干液流通量(*SV*)日动态变化

雨天梭梭树干液流日变化规律不明显,呈现双峰或者多峰现象(图 3)。6、7、8 月份降雨时,*SV* 昼夜变化较小,夜间液流现象较为明显,1 号样树夜间液流量最高。7 月 21 日的 16.2 mm 降雨量,各样树全天液流通量较平稳,夜间液流现象明显。而 9 月份降雨量较小,昼夜 *SV* 相对差异较大。同比相同月份晴天 *SV*,雨天梭梭 *SV* 值较小,各样树 *SV* 最高值在 12.00—14.41 $cm^3\ cm^{-2}\ h^{-1}$之间(图 2,图 3)。

3.2.3 典型阴天树干液流通量(*SV*)日动态变化

阴天梭梭树干液流日变化规律与净辐射变化趋势较为一致(图 4)。阴天 *SV* 日变化整体呈现双峰或单峰现象。6、8 月份,各样树 *SV* 日变化差异不明显,而 9 月份各样树 *SV* 差异较大,并且与净辐射日变化趋势差异显著。阴天 *SV* 最高峰均显著低于晴天 *SV*,各样树 *SV* 最高值在 9.21—9.90 $cm^3\ cm^{-2}\ h^{-1}$之间。

3.3 树干液流通量 *SV* 季节变化

6—11 月份,各样树 *SV* 变化趋势差异较小,但 *SV* 日际变化波动幅度较大(图 5)。1、2 号样树 *SV* 表现出

先升高后降低的趋势,且 7 月份 *SV* 最高。3 号样树树干液流表现为持续降低的趋势。从 10 月 14 日开始,各样树 SV 变化趋势较为平稳。由图 5 可得,1、2、3 号样树日均液流通量值分别为 146.79、119.89、120.62 cm^3 cm^{-2} d^{-1},液流通量最大值分别为 325.70、283.89、257.89 cm^3 cm^{-2} d^{-1},最小值为 17.15、30.16、29.79 cm^3 cm^{-2} d^{-1}。在生长旺盛期的 6—8 月份,1 号样树 *SV* 值明显高于 2、3 号样树,3 号样树的 *SV* 值最小。

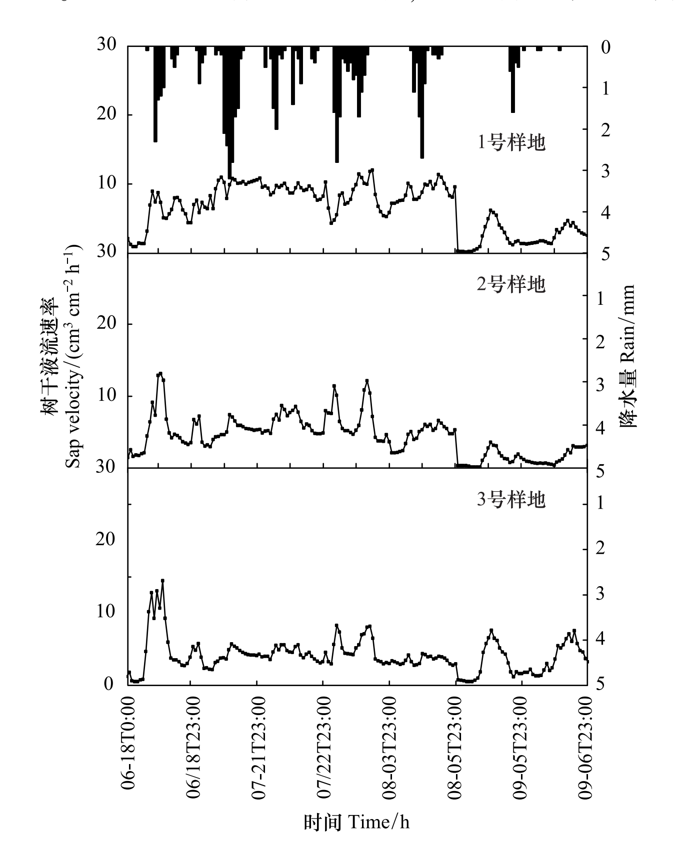


图 3 雨天梭梭树干液流通量日变化

Fig. 3 Diurnal variation of stems sap flow flux in *Haloxylon ammodendron* in rainy day

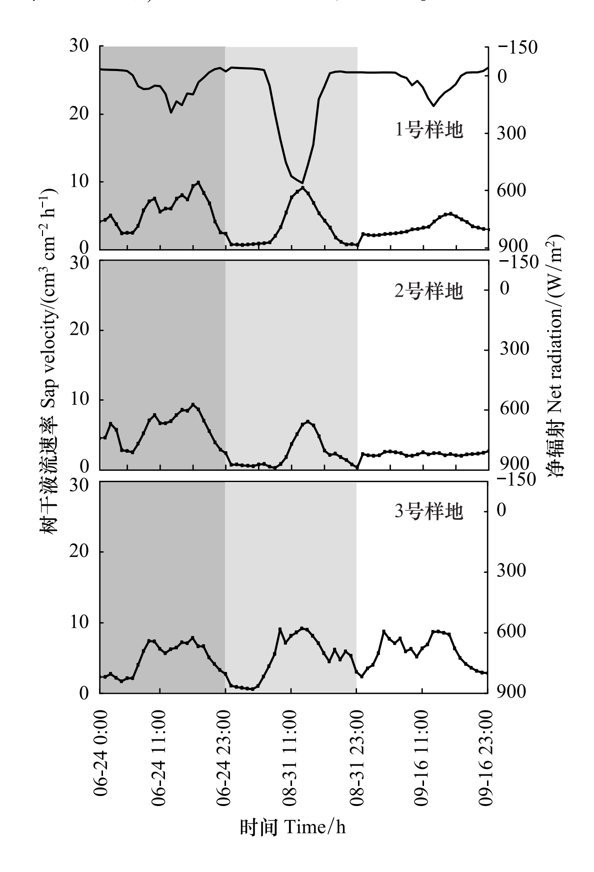


图 4 阴天梭梭树干液流通量日变化

Fig. 4 Diurnal variation of stems sap flow flux in *Haloxylon ammodendron* in cloudy day

3.4 梭梭生长季耗水量动态变化

整个生长季,不同月份各样树耗水量如图 6 所示。1、2、3 号梭梭总耗水量实测值差异较大,分别为:495.797、583.020、1232.727kg,平均样树为 770.515kg。各样树日均耗水量表现出随直径的增大,日均耗水量逐渐增大的趋势。不同直径梭梭日均液流量变化趋势表现出不同程度的差异,其中,3 号样树 *SV* 与 1、2 号样树 *SV* 差异显著。1、2 号样树日均液流量随月份增加,表现为先升后降的趋势。7 月份液流量达到最高值;3 号样树呈现逐渐降低趋势。6—11 月份,平均直径梭梭液流量表现为先增后降的趋势,各月份日均耗水量依次为 8.2、8.3、6.4、4.3、2.7、2.0 kg/d,整个生长季梭梭平均日耗水量为 5.1 kg/d。利用 3 株样树平均树冠面积 6.4m^2,将单位为 kg 的日均耗水量、总耗水量换算成以 mm 为单位的耗水量,进而得出,梭梭日均耗水量为 0.8mm,总耗水量为 120.0mm。相比,参考作物蒸散量 ET_0,梭梭耗水量很低,仅为 ET_0的 35.6%(图 1)。

3.5 树干液流与气象因子的相关性

3.5.1 日尺度树干液流与气象因子相关性

2014 年 6 月 18 日至 11 月 30 日,各月份梭梭 *SV* 与气象因子相关程度差异明显(表 2)。6 月份 *SV* 与净辐射(*Rn*)相关性最高,7 月份与相对湿度(*RH*)相关性最高,8 月份与空气温度(*T*)、饱和水汽压差(VPD)相关性最高,10 月份影响各样树 *SV* 的主要气象因子差异较大,而 9、11 月份液流速率与 T,*RH*,*Rn*,VPD 不存在

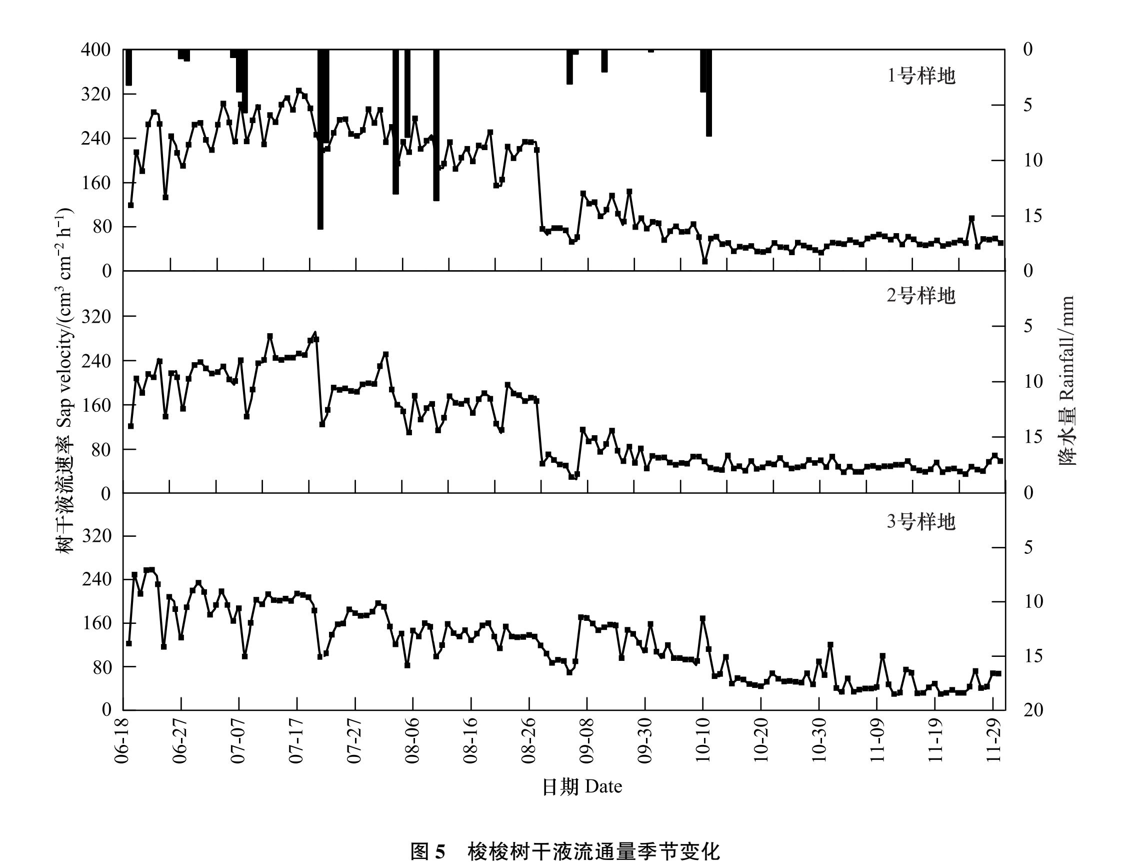


图 5　梭梭树干液流通量季节变化

Fig.5　The seasonal variation of sap flow flux in stems of *Haloxylon ammodendron*

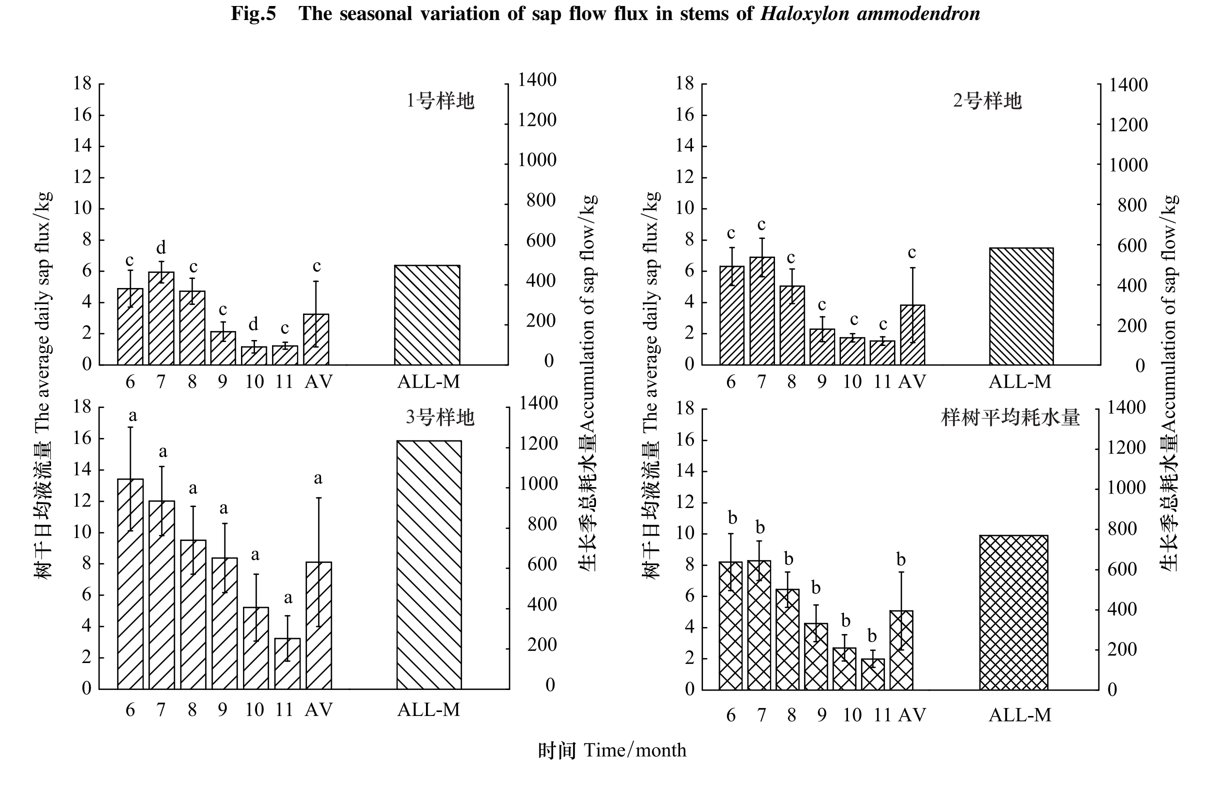


图 6　梭梭不同月份日均液流量及耗水量

Fig.6　The daily and accumulation of sap flow of *Haloxylon ammodendron* in different months

方差分析:小写字母表示不同直径相同时间内各样树树干液流量之间的比较,其中相同字母代表差异不显著(P>0.05),不同字母代表差异显著(P<0.05);AV:6—11 月日均耗水量;ALL-M:耗水量实测值

显著相关性。同时发现,随着直径的增大,*SV* 与气象因子的相关程度越高。6—11 月,外界气象因子对梭梭 *SV* 的影响程度依次为:空气温度 > 净辐射 > 饱和水汽压差 > 相对湿度。

表 2 日尺度树干液流与气象因子相关分析

Table 2 Correlation analysis between sap flow rate and meteorological factors in daily scale

直径 Diameter/cm	月份 Month	空气温度 *T*/℃	相对湿度 *RH*/%	净辐射 *Rn*/(W/m^2)	饱和水汽压差 VPD/kPa
9.9	6	0.807**	−0.745**	0.858**	0.781**
	7	0.542**	−0.534**	0.674**	0.557**
	8	0.447**	−0.202	0.380*	0.290
	9	−0.007	0.201	0.401	−0.162
	10	0.578**	−0.328	0.781**	0.577**
	11	0.341	0.227	0.087	0.089
	Total	0.815**	−0.143	0.792**	0.720**
10.95	6	0.791**	−0.709**	0.816**	0.734**
	7	0.494**	−0.733**	0.486**	0.584**
	8	0.535**	−0.546**	0.446**	0.603**
	9	0.171	0.116	0.580*	−0.036
	10	0.481**	−0.216	0.203	0.433*
	11	−0.179	0.149	0.117	−0.152
	Total	0.797**	−0.238**	0.759**	0.757**
13.06	6	0.565*	−0.683*	0.924**	0.653*
	7	0.727**	−0.884**	0.691**	0.769**
	8	0.743**	0.686**	0.659**	0.739**
	9	0.023	0.157	0.238	−0.128
	10	0.236	0.049	0.461**	0.180
	11	0.056	−0.056	0.012	0.118
	Total	0.835**	−0.264**	0.803**	0.764**
平均直径	6	0.750**	−0.746**	0.910**	0.756**
Average	7	0.654**	0.809**	0.682**	0.712**
	8	0.570**	−0.494**	0.526**	0.571**
	9	0.059	0.166	0.407	−0.117
	10	0.454*	−0.126	0.632**	0.408*
	11	0.099	0.072	0.067	0.070
	Total	0.842**	−0.213**	0.811**	0.769**

** 极显著相关($P<0.01$),* 显著相关($P<0.05$),Average 为 1, 2, 3 号样树的均值

3.5.2 小时尺度树干液流与气象因子响应

2014 年 6 月 18 日至 11 月 30 日,*SV* 与各气象因子均表现出极显著相关性(表 3)。晴天条件下,梭梭 *SV* 与各气象因子相关程度均高于阴、雨天。各样树整体表现出,晴、阴天条件下,*SV* 主要影响因子为 VPD。而雨天各样树的主要影响因子略有差异,同时受 T、*Rn* 和 VPD 的共同影响。降水量(Rain)与 *SV* 表现出极显著相关($P<0.01$),相关程度依次为:3 号样树>2 号样树>1 号样树。

3.6 树干液流与土壤水分的相关性

由表 4 可见,晴天条件下,梭梭样树 *SV* 与距离样树茎基 0—250cm 之间的土壤水分 VSW 均存在极显著相关性。其中,距离样树茎基 20cm 处的 VSW 与 *SV* 之间存在负相关性,其余 2 个水平位点 VSW 与 *SV* 存在正相关性。梭梭 *SV* 与茎基 400cm 处的 VSW 之间不存在显著相关性。阴、雨天条件下,梭梭 *SV* 与不同水平位点的 VSW 之间不存在显著相关性。

表 3　小时尺度树干液流与气象因子相关分析

Table 3　Correlation analysis between sap flow rate and meteorological factors in hourly scale

直径 Diameter/cm	天气状况 Weather	空气温度 T/℃	相对湿度 RH/%	净辐射 Rn/(W/m^2)	饱和水汽压差 VPD/kPa	降水量 Rain/mm
9.9	晴天	0.711**	-0.457**	0.764**	0.783**	—
	阴天	0.545**	-0.454**	0.713**	0.721**	—
	雨天	0.613**	-0.162**	0.516**	0.446**	0.111**
10.95	晴天	0.613**	-0.415**	0.721**	0.733**	—
	阴天	0.417**	-0.368**	0.504**	0.568**	—
	雨天	0.527**	-0.293**	0.513**	0.553**	0.223**
13.06	晴天	0.708**	-0.546**	0.760**	0.804**	—
	阴天	0.560**	-0.495**	0.677**	0.672**	—
	雨天	0.394**	-0.417**	0.607**	0.582**	0.305**
平均直径	晴天	0.697**	-0.482**	0.770**	0.794**	—
Average	阴天	0.565**	-0.488**	0.708**	0.731**	—
	雨天	0.564**	-0.299**	0.584**	0.562**	0.240**

* * 极显著相关(P<0.01), * 显著相关(P<0.05);Average:1, 2, 3 号样树的均值;其中,降雨量数据为大于 5mm 降雨的当天实时数据

表 4　树干液流与土壤水分相关分析

Table 4　Correlation analysis between sap flow rate and soil moisture

土层 Layer/cm	晴天 Sunny day				阴、雨天 Cloudy and rainy day			
	水平间距 Horizontal spacing/cm				水平间距 Horizontal spacing/cm			
	A	B	C	D	A	B	C	D
0—10	-0.543**	0.602**	0.571**	0.120	-0.243	0.203	0.177	-0.153
0—50	-0.508**	0.571**	0.579**	0.108	-0.369	0.165	0.227	-0.164
0—100	-0.578**	0.574**	0.573**	0.082	-0.403	0.170	0.199	-0.175
0—150	-0.482**	0.574**	0.569**	-0.168	-0.320	0.173	0.194	-0.261

大写字母 A,B,C,D 分别代表距离梭梭样树水平距离 20、150、250、400cm; * * 极显著相关(P<0.01), * 显著相关(P<0.05)

表 5　不同地点梭梭耗水量比较

Table 5　Comparison of water consumption of *Haloxylon ammodendron* in different conditions

植被 Plant	测定时间/地点 Time and site conditon	测定方法 Method	梭梭直径/cm Diameter	日耗水量/总耗水量/kg Daily water/Total water	文献 Reference
原生梭梭 *Haloxylon ammodendron*	5—10 月/古尔班通古特沙漠	热平衡包裹式	9.9—22.9	2.8—6.4/458—1044	[24]
原生梭梭 *Haloxylon ammodendron*	7—8 月/古尔班通古特沙漠	热脉冲法	9.0	1.8/37.5	[26]
人工梭梭 Artificial *Haloxylon ammodendron*	7—8 月/古尔班通古特沙漠	热脉冲	4.6	1.9/38.9	[26]
原生梭梭 *Haloxylon ammodendron*	4—9 月/古尔班通古特沙漠	热脉冲	7.8—9	2.5—4.6/400—500	[12]
原生梭梭 *Haloxylon ammodendron*	5—10 月/内蒙古额济纳	热脉冲	5.5	2.3/344.7	[27]
人工梭梭 Artificial *Haloxylon ammodendron*	4—10 月/塔克拉玛干沙漠	热平衡包裹式	4.0	1.5—3.0/300—600	[25]
人工梭梭 Artificial *Haloxylon ammodendron*	5—9 月/临泽内陆河流域	热脉冲	6—14	1—8/49.9mm	[11]

4 讨论

4.1 树干液流通量 *SV* 动态变化规律

晴天,随着月份增加 *SV* 启动时间逐渐延后(图 2),这可能由于日出时间规律性递减影响所致。相比 9—11 月 *SV* 窄峰型日变化及无明显波峰现象,6—8 月 *SV* 日变化曲线呈现“宽峰型”现象。这主要由于 6—8 月日照时间长、太阳辐射启动早、结束晚的特点以及正午的高强度辐射,造成梭梭同化枝气孔关闭抑制枝叶高强度蒸腾所致。该结果与吴芳[33]和冯起[27]等人研究刺槐、梭梭日变化结果相一致。梭梭进入生长季末期(9—11 月份),*SV* 迅速降低,同时 *SV* 启动时间逐渐推迟,这主要是由于梭梭自身代谢的降低造成了其对土壤水分吸收的减弱。阴、雨天时,空气温度降低、相对湿度增高、饱和水汽压差突降,造成梭梭 *SV* 明显低于晴天 *SV*。该现象与孙慧珍[34]、熊伟[35]、夏桂敏[36]研究白桦树干液流、华北落叶松、荒漠区柠条树干液流的结果一致。7 月 21—22 日,梭梭 *SV* 夜间液流量与白天差异不明显(图 3)。这可能的原因为 7 月份空气温度相对较高、风速较高促进了同化枝气孔开放;白天降雨时,较低的饱和水汽压差阻碍了部分同化枝气孔开放,造成白天土壤水分未能充分运输到梭梭地上部供梭梭吸收利用,进而促进夜间液流量,补充梭梭体内水分,恢复梭梭水分平衡[25]。梭梭 *SV* 季节性波动较大,主要原因为土壤水分胁迫、空气干燥以及辐射强度高造成了梭梭根系吸水与植被蒸腾的时滞现象;同时由于气象因子(空气温度、净辐射、饱和水汽压差)的波动性,造成树干液流一定程度的波动。

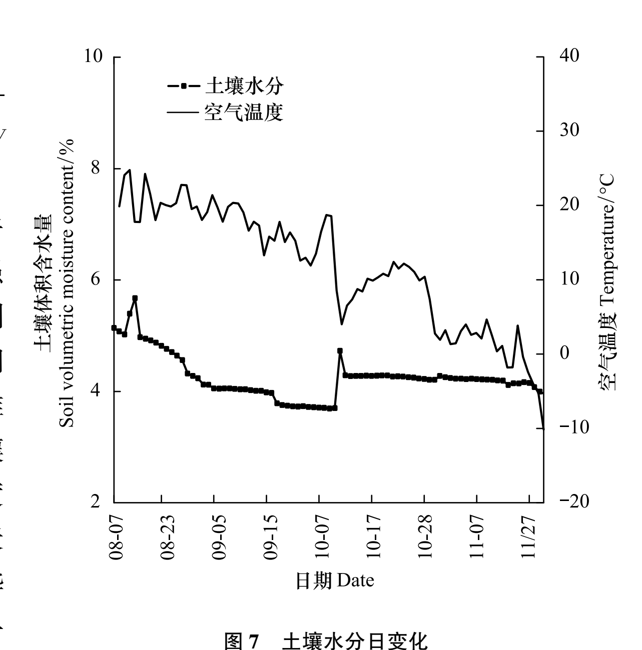


图 7 土壤水分日变化

Fig.7 Diurnal variation of soil moisture

土壤体积含水量数据为距梭梭样树 0—250cm 水平位点处 0—150cm 土层实测值的平均值

4.2 梭梭耗水量变化特征

梭梭边材面积与直径存在的指数函数关系,说明直径越大的梭梭,边材面积越大。而梭梭根部吸收的水分主要通过边材中的导管向上运输,并经同化枝气孔释放到大气。梭梭直径越大,梭梭耗水量越高(图 6),与气象因子的相关程度越高(表 2),造成 *SV* 随季节的变化波动性越大(图 4),且 7 月份梭梭耗水量达到最高值。这主要是由于 7 月份的降水量最高,植被生长最旺盛,受土壤水分胁迫的影响小,进而耗水量最大。该结果与曹晓明等[24]、孙鹏飞等[12]、张利刚等[37]、Yang 等[38]研究结果相一致。但是,不同直径的梭梭液流通量密度并未表现出直径越大液流通量越大的特点[28](图 2—4),这充分说明在直径差异较小的条件下梭梭液流通量密度与直径不存在正相关性。相比古尔班通古特沙漠以及黑河流域中游等生境的梭梭,民勤绿洲荒漠过渡带稀疏梭梭林中的梭梭与古尔班通古特沙漠相同直径的原生梭梭日均耗水量相似[12,24](表 5)。并且,梭梭耗水量仅占参考作物蒸散量的 35.60%,说明梭梭具有较强的环境适用性,同时也是一种节水、抗旱性强的植物。

4.3 环境因子对树干液流通量的影响

不同时间尺度下,梭梭 *SV* 与各气象因子的相关性差异较大(表 2,表 3)。在日尺度上,6 月份梭梭处于生长旺盛期,光照对同化枝光合作用以及蒸腾作用的影响较大,导致 *Rn* 成为制约 *SV* 最敏感因子;7 月份降水较为频繁,土壤水分含量相对较高,*RH* 成为制约同化枝气孔开放的主要限制因子;8 月份梭梭 *SV* 与 T、VPD 的相关性最高,而 10 月份各样树 *SV* 主要影响因子差异较大。以上说明,气象因子是一个综合因子,其对梭梭

SV 的影响是复杂而多变的。9 月份各样树 *SV* 与气象因子相关性不显著(表 4),这主要是由于 9 月份降水较少(图 5),土壤水分含量低(图 7),且梭梭同化枝衰退、木质化程度高、自身代谢较低,造成了梭梭 *SV* 与气象因子之间的相关性不显著。受土壤水分胁迫、梭梭自身生长代谢的影响,9 月份阴天各样树 *SV* 日变化趋势差异较大。这与孙鹏飞等[12]研究发现在土壤水分胁迫条件下,*SV* 与气象因子不存在相关性的结论一致。而 11 月份 *SV* 与气象因子相关性不显著,主要是由于梭梭枝叶枯黄、代谢减弱,*SV* 受自身代谢的影响较大,同时空气温度以及辐射较低,阻碍了梭梭蒸腾。

土壤水分对梭梭蒸腾耗水的影响较为复杂[12,39],而土壤水分含量、梭梭根系分布不均是影响梭梭蒸腾耗水的主要原因。晴天时,梭梭 *SV* 与根区 250cm 范围内的 VSW 存在极显著相关性,并且 *SV* 与距茎基 20cm 处 VSW 存在极显著负相关,这可能是由于梭梭吸水根系集中分布在距茎基 20cm 以外,土壤水分一部分被根系吸收,一部分储存于茎基处。梭梭 *SV* 与 0—100cm 土层 VSW 相关性最高,也充分说明梭梭吸水根系主要集中在 100cm 土层以上。

5　结论

(1)晴天时,随月份增加,梭梭树干液流通量日变化启动时间和波峰区均依次递减,并且 6—8 月份梭梭液流出现明显的"宽峰型"现象。阴、雨天,梭梭树干液流通量日变化成双峰或多峰型,并且树干液流通量明显低于晴天。

(2)不同直径梭梭 *SV* 季节波动性较大,并且直径越大波动越高。梭梭日均液流通量值在 119.89—146.79 $cm^3\ cm^{-2}\ d^{-1}$之间。6—11 月,不同直径梭梭树干液流量均表现出先增后降的变化趋势,7 月份液流量最高。

(3)梭梭液流通量与气象因子响应关系因月份及时间尺度的不同表现出较大差异。日尺度 *SV* 与气象因子的相关性程度依次为:空气温度>净辐射>饱和水汽压差>相对湿度。小时尺度,晴天、阴天 *SV* 主要影响因子为 VPD。

(4)土壤水分是干扰气象因子对梭梭液流通量响应程度的主要因子。晴天根区梭梭土壤水分与树干液流极显著相关,并且 100cm 土层以上的 0—250cm 根区是影响树干液流的主要区域。

(5)在整个观测期间,随着直径增大,梭梭总耗水量表现出增大趋势。梭梭总耗水量为 495—1232kg、日均耗水量为 2.0—8.3 kg/d,并且耗水量近似于古尔班通古特沙漠梭梭生长季(5—10 月)总耗水量 458—1044kg 以及日均耗水量 1.8—6.4 kg/d。利用 TDP 技术测定梭梭耗水量具有一定的可靠性。

参考文献(References):

[1] Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, Lammers R B. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. Science, 2000, 289(5477): 284-288.

[2] 陈敏建. 我国水资源研究的发展趋势. 水利水电技术, 2001, 32(1): 16-19.

[3] Ma Z M, Kang S Z, Zhang L, Tong L, Su X L. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China. Journal of Hydrology, 2008, 352(3/4): 239-249.

[4] Hu X J, Xiong Y C, Li Y J, Wang J X, Li F M, Wang H Y, Li L L. Integrated water resources management and water users' associations in the arid region of northwest China: A case study of farmers' perceptions. Journal of Environmental Management, 2014, 145: 162-169.

[5] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources. Science, 2006, 313(5790): 1068-1072.

[6] Asbjornsen H, Goldsmith G R, Alvarado-Barrientos M S, Rebel K, Van Osch F P, Rietkerk M, Chen J Q, Gotsch S, Tobón C, Geissert D R, Gomez-Tagle A, Vache K, Dawson T E. Ecohydrological advances and applications in plant-water relations research: a review. Journal of Plant Ecology, 2011, 4(1/2): 3-22.

[7] Dai A. Drought under global warming: a review. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1): 45-65.

[8] Su P X. Photosynthesis of C_4 desert plants // Ramawat K G. Biology and Biotechnology. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 243-259.

[9] 常兆丰, 赵明. 民勤荒漠生态研究. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2006: 1-8.

[10] 常兆丰. 民勤人工绿洲的形成、演变及其可持续性探讨. 干旱区研究, 2008, 25(1): 1-9.

[11] 常学向, 赵文智, 张智慧. 荒漠区固沙植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)耗水特征. 生态学报, 2007, 27(5): 1826-1837.

[12] 孙鹏飞，周宏飞，李彦，李妙伶．古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量．生态学报，2010，30(24)：6901-6909.

[13] 单立山，李毅，张希明，王蕙．灌溉对三种荒漠植物蒸腾耗水特性的影响．生态学报，2012，32(18)：5692-5702.

[14] 张劲松，孟平，尹昌君．植物蒸散耗水量计算方法综述．世界林业研究，2001，14(2)：23-28.

[15] Wullschleger S D，Meinzer F C，Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in tree. Tree Physiology，1998，18(8/9)：499-512.

[16] Lo Gullo M A，Castro Noval L Salleo S，Nardini A. Hydraulic architecture of plants of *Helianthus annuus* L. cv. Margot：evidence for plant segmentation in herbs. Journal of Experimental Botany，2004，55(402)：1549-1556.

[17] Nogueira A，Martinez C A，Ferreira L L，Prado C H B A. Photosynthesis and water use efficiency in twenty tropical tree species of differing succession status in a Brazilian reforestation. Photosynthetica，2004，42(3)：351-356.

[18] 马玲，赵平，饶兴权，蔡锡安，曾小平．乔木蒸腾作用的主要测定方法．生态学杂志，2005，24(1)：88-96.

[19] 邓东周，范志平，王红，孙学凯，高俊刚，曾德慧．林木蒸腾作用测定和估算方法．生态学杂志，2008，27(6)：1051-1058.

[20] 袁国富，张娜，孙晓敏，温学发，张世春．利用原位连续测定水汽 $\delta^{18}O$ 值和 Keeling Plot 方法区分麦田蒸散组分．植物生态学报，2010，34(2)：170-178.

[21] Smith D M，Allen S J. Measurement of sap flow in plant stems. Journal of Experimental Botany，1996，47(12)：1833-1844.

[22] Swanson R H. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. Agricultural and Forest Meteorology，1994，72(1/2)：113-132.

[23] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. Tree Physiology，1987，3(4)：309-320.

[24] 曹晓明，陈曦，王卷乐，王权，王珊珊．古尔班通古特沙漠南缘非灌溉条件下梭梭(*Haloxylon ammodendron*)蒸腾耗水特征．干旱区地理，2013，36(2)：292-302.

[25] 许浩，张希明，闫海龙，孙红叶，单立山．塔克拉玛干沙漠腹地梭梭(*Haloxylon ammodendron*)蒸腾耗水规律．生态学报，2008，28(8)：3713-3720.

[26] 李妙伶，周宏飞，孙鹏飞．准噶尔盆地南缘梭梭树干液流规律比较．干旱区研究，2012，29(1)：101-108.

[27] 冯起，司建华，席海洋，常宗强，苏永红，曹生奎，郭瑞．极端干旱区天然植被耗水规律试验研究．中国沙漠，2008，28(6)：1095-1103.

[28] Zheng C L，Wang Q. Seasonal and annual variation in transpiration of a dominant desert species，*Haloxylon ammodendron*，in Central Asia up-scaled from sap flow measurement. Ecohydrology，2015，8(5)：948-960.

[29] Zheng C L，Wang Q. Water-use response to climate factors at whole tree and branch scale for a dominant desert species in central Asia：*Haloxylon ammodendron*. Ecohydrology，2014，7(1)：56-63.

[30] Granier A. Sap flow measurements in *Douglas-fir* tree trunks by means of a new thermal method. Annals of Forest Science，1987，44(1)：1-14.

[31] 马玲，赵平，饶兴权，蔡锡安，曾小平，陆平．马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系．生态学报，2005，25(9)：2145-2151.

[32] Allen R G，Pereira L S，Raes D，Smith M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome：FAO，1998.

[33] 吴芳，陈云明，于占辉．黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态．植物生态学报，2010，34(4)：469-476.

[34] 孙慧珍，周晓峰，赵惠勋．白桦树干液流的动态研究．生态学报，2002，22(9)：1387-1391.

[35] 熊伟，王彦辉，徐德应．宁南山区华北落叶松人工林蒸腾耗水规律及其对环境因子的响应．林业科学，2003，39(2)：1-7.

[36] 夏桂敏，康绍忠，李王成，王锋，屈艳萍．甘肃石羊河流域干旱荒漠区柠条树干液流的日季变化．生态学报，2006，26(4)：1186-1193.

[37] 张利刚，曾凡江，刘镇，刘波，安桂香，袁娜．极端干旱区 3 种植物液流特征及其对环境因子的响应．干旱区研究，2013，30(1)：115-121.

[38] Yang W X，He X L，Yang G，Xu S D，Chen S. The study of native plants water consumption characteristic in Gurbantunggut desert. Applied Mechanics and Materials，2013，295-298：189-197.

[39] Li C J，Shi X，Lei J Q，Xu X W. The scale effect on the soil spatial heterogeneity of *Haloxylon ammodendron*（C. A. Mey.）in a sandy desert. Environmental Earth Sciences，2014，71(9)：4199-4207.